

腭中缝成熟度分期的研究进展

李嘉欣, 戴红卫*

重庆医科大学附属口腔医院正畸科, 口腔疾病研究重庆市重点实验室, 口腔生物医学工程重庆市高校市级重点实验, 重庆市卫生健康委口腔生物医学工程重点实验室, 重庆

收稿日期: 2025年8月26日; 录用日期: 2025年9月19日; 发布日期: 2025年9月28日

摘要

上颌快速扩张是用于治疗上颌横向发育不足的常用方法, 其效果主要受腭中缝阻力的影响。根据 Angelieri 等的分类方法, 将腭中缝成熟度分为了 A~E 期, C 期及以前的患者推荐使用常规的上颌快速扩弓。此外, 分形分析和腭中缝骨密度比率等定量方法也为评估腭中缝成熟度提供了重要手段。腭中缝成熟度与年龄、性别有着明显的相关性, 且与颈椎骨龄也呈显著的正相关, 在一定程度上有助于扩弓方式和时机的选择。在人工智能方面, 腭中缝成熟度分期的识别也有了重大的突破, 大大提高了诊断的准确率和效率。

关键词

上颌快速扩张, 腭中缝成熟度, 颈椎骨龄, 人工智能

Research Progress on Midpalatal Suture Maturation Stages

Jiaxin Li, Hongwei Dai*

Department of Orthodontics, The Affiliated Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing Key Laboratory of Oral Diseases, Chongqing Municipal Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering of Higher Education, Chongqing Municipal Health Commission Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering, Chongqing

Received: August 26, 2025; accepted: September 19, 2025; published: September 28, 2025

Abstract

Rapid maxillary expansion, a widely used treatment for maxillary transverse deficiency, is primarily influenced by resistance from the midpalatal suture. Angelieri *et al.* classify midpalatal suture

*通讯作者。

maturation into stages A~E, recommending conventional rapid maxillary expansion for patients at stage C or earlier. Additionally, quantitative techniques including fractal analysis and midpalatal suture density ratio serve as essential methods for evaluating its maturation. Midpalatal suture maturation correlates significantly with age, gender and cervical vertebral maturation stages. To some extent, this correlation aids in selecting the expansion approach and timing. In the field of artificial intelligence, significant breakthroughs have occurred in identifying midpalatal suture maturation stages, substantially enhancing diagnostic accuracy and efficiency.

Keywords

Rapid Maxillary Expansion, Midpalatal Suture Maturation, Cervical Vertebral Maturation, Artificial Intelligence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 文献检索策略

为全面收集与“腭中缝成熟度分期”相关的研究文献,本研究系统检索了 PubMed、Web of Science、Embase、中国知网(CNKI)和万方数据知识服务平台等中英文数据库。检索时间范围为建库至 2025 年 8 月。英文检索词包括:“midpalatal suture maturation”、“MPSM”、“rapid maxillary expansion”、“RME”、“cone-beam computed tomography”、“CBCT”、“cervical vertebral maturation”、“artificial intelligence”等;中文检索词包括:“腭中缝成熟度”、“上颌快速扩弓”、“锥形束 CT”、“颈椎骨龄”、“人工智能”等。检索策略采用主题词与自由词相结合的方式,并通过布尔逻辑运算符(AND、OR)进行组合。初步检索后,经去重、阅读标题与摘要初筛、全文精读后,最终纳入 61 篇文献进行综述分析。文献纳入标准包括:与腭中缝成熟度评估、上颌快速扩弓疗效及相关影像学或人工智能技术相关的研究;排除标准包括:非中英文文献、无法获取全文、个案报告及会议摘要等。

2. 引言

颅颌面的生长发育是一个四维变化的复杂过程,与长、宽、高以及时间有关,横向的生长首先完成的,其次是矢状向,最后是垂直向[1]。这三个方向上的生长往往是相互关联与影响的,因此对于横向生长发育的问题,要尽早处理避免颅颌面生长发育的异常。上颌横向发育不足在临床上较为常见,表现为腭盖高而深,上颌牙弓狭窄,呈尖圆型,牙列不齐并伴有扭转、拥挤,以及后牙反合等等[2]。治疗上颌横向发育不足的主要方法为扩弓,但对于扩弓的正确时机目前还没有统一的定论。因此通过腭中缝成熟度(midpalatal suture maturation, MPSM)分期来掌握正确的扩弓时机和方式对于患者的矫治效果和防止严重并发症的发生具有重要的指导意义。

3. 腭中缝成熟度

上颌快速扩张(rapid maxillary expansion, RME)是被用于治疗上颌横向发育不足及后牙反合等的常规方法,是由 Angell 提出,后由 Hass 等人发展[3]-[6],目前上颌快速扩张的方法主要包括传统牙支持式上颌快速扩弓(Tooth-anchored Rapid Maxillary Expansion, T-RME)、微种植钉辅助上颌快速扩弓(Miniscrew Assisted Rapid Palatal Expansion, MARPE)及手术辅助上颌快速扩张(Surgically Assisted Rapid Maxillary

Expansion, SARME)。每一种上颌快速扩弓的时机以及治疗过程中的创伤明显不同, 治疗的时机是决定这三种方法的疗效和副作用严重程度的关键[7]。对成人行传统的 T-RME 往往会导致治疗失败, 且伴随牙槽骨的弯曲变形、骨开窗或骨开裂、后牙颊向倾斜、稳定性差、牙龈退缩和粘膜溃疡或坏死等不良副作用。因为成年人的腭中缝大多数已骨化完全, 常常应选择 MARPE 或是 SARME。尽管大多数研究表明在青春期前期推荐使用传统 T-RME, 但转化为 MARPE 或 SARME 的年龄与时机并不明确[8]。

腭中缝是上颌生长发育的主要部位之一, 也是 RME 的主要抵抗部位[1]。腭中缝随着生长发育而逐渐发生由后向前地融合[9], 因此通过腭中缝的成熟和骨化的状态, 来判断上颌骨横向发育的状态, 对选择扩弓的时机和方式具有非常重要的临床意义。组织学检查判断腭中缝的成熟和骨化状态, 无疑是金标准, 但其为有创操作, 具有侵入性, 临床上很难实现[6][10]。影像学检查中, 早期 Revelo 和 Fishman [11] 建议在 RME 治疗前通过 X 线片对腭中缝形态进行个体评估。然而, X 线片在分析腭中缝形态时并不可靠, 因为犁骨和外鼻的结构覆盖腭中缝的区域, 因此可能导致腭中缝融合的错误 X 线片解释。而锥形束计算机断层扫描(cone-beam computed tomography, CBCT)能提供准确的三维影像, 没用相邻结构的重叠, 具有更好的骨骼对比度、分辨率、更低的辐射暴露和更低的成本[12][13]。

3.1. 基于 CBCT 的腭中缝成熟度分期标准

为了更加准确地评估腭中缝成熟和骨化的状态, 在 2013 年, Angelieri 等人[14]提出了一种新的基于 CBCT 的分类方法, 该方法通过观察腭中缝在标准化二维截面图上的形态特征, 将其成熟度划分为 5 个阶段: A 期: 为腭中缝呈一条较为平直的高密度线, 没有或很少相互交叉; B 期: 高密度直线变得不规则, 呈锯齿状①; 或者在某些区域出现两条平行的锯齿状的互相接近的高密度影像, 中间被低密度影像隔开②; C 期: 切牙孔后方腭中缝呈现为 2 条平行的锯齿状高密度线条, 彼此接近; 骨缝可以是直的也可以是不规则的; D 期: 腭中缝开始发生从后向前的融合, 腭中缝后部完全骨化、低密度影像消失; E 期: 腭中缝前部亦发生融合, 部分区域骨缝影像消失, 骨质密度同腭部其他区域。并且根据此分期方法推测: 与 C 期相比, 处于 A 期和 B 期的患者对 RME 的抵抗力更小以及产生的骨骼效应更大, 因此对上颌骨横向扩弓的效果更加显著。C 期应该值得特别关注, 该阶段腭中缝区域出现了许多被称为骨岛[15]的初始骨化区域。这通常预示着腭中缝的融合即将发生。因此, C 期的初步诊断对 RME 的时机选择是至关重要的。而对于 D 期和 E 期的患者, 由于腭中缝已经部分或者完全融合, 更推荐采用 MARPE 或 SARME。三年后, Angelieri 等人[16]进一步补充指出, 在 C 期虽然腭中缝阻力增加, 但采用常规 T-RME 进行上颌横向扩弓仍然是可行的。

综上所述, 对于 MPSM 分期在 C 期及以前的患者优先考虑常规 T-RME, 而处于 D、E 期的患者更加推荐 MARPE 或 SARME。因此, 在制定扩弓方案之前, 利用 CBCT 评估 MPSM, 对于选择合适的治疗方案具有重要的临床指导意义。

3.2. 腭中缝成熟度与年龄、性别的相关性

Angelier 等人[14]证实 MPSM 与年龄具有一定相关性, 传统观点[17]认为腭中缝在 15 岁之后开始融合, 因此在 15 岁之前被认为是使用 T-RME 的最佳窗口期。在临床上, 20~25 岁成人被普遍认为他们的腭中缝已完全骨化。然而, 实际情况远比这复杂。Persson 等人[18]研究发现, 有些患者在 27 岁、32 岁、54 岁, 甚至 71 岁时腭中缝都仍然没有完全融合。一些学者[19]也证实了在成人中使用常规 RME 成功的案例。2017 年, Angelieri 等[20]在评估 78 名成人的 CBCT 后发现, 12% 的人腭中缝仍然未完全融合。更有针对性研究[21]揭示了不同年龄段的未融合率, 10~15 岁患者中腭中缝没有融合的概率为 70.8%, 16~20 岁和 21~25 岁的患者中则分别为 21.2%和 17%。且在 16 岁以上的患者中, 出现这种情况的男性多于女

性。多项研究指出[18][22][23], 在年轻成人患者中, 这种可能性实际更大。因此, 单纯依靠年龄来评估腭中缝在生长期间发育的状况, 并不是一个可靠参数[7], 特别是处于青少年晚期和年轻成人的患者。

同时 MPSM 与性别也具有一定相关性, 有文献表明, 女性腭中缝融合通常早于男性[21]。Angelieri 等[14]评估了年龄在 5.6 至 58.4 岁之间的 140 名受试者的样本, 并证实在 11 岁以上的女孩和 14 岁以上的男孩腭中缝开始逐渐融合。临床上, 这种性别特征在腭中缝融合中已被注意到, 女性通常比男性成熟得早。有趣的是, 这些结果也证实了 RME 在青少年晚期(主要是女性)和成年人失败的临床发现。

3.3. 腭中缝成熟度分期与颈椎骨龄分期的相关性

腭中缝骨化的状态和闭合的年龄存在着个体差异[17], 开始骨化闭合的时间与骨骼的生长发育进程密切相关[18]。在正畸治疗中, 评估青少年生长发育高峰期的一个常用方法就是颈椎骨龄分期(cervical vertebral maturation stage, CS) [24] [25]。

Angelieri 等[14] [26]通过 CBCT 初步探讨了 MPSM 分期与 CS 的相关性, 研究表明: Cs1、Cs2 期可作为腭中缝处于 A 期或 B 期的可靠指标, CS3 期可靠地对应了 MPSM 的 C 期, Cs5 期代表腭中缝进入了 D 期或 E 期。然而, 值得注意的是, 对于青春期后的患者, 仍应该使用 CBCT 进行个体评估。因为其中仍有 13.5% 的患者仍处于 C 期, 可能仍可以接受常规 RME 治疗。此外, 该研究样本量相对较小, 仅包含 140 例。Barbosa 等人[27]认为可靠性与可重复性较低。且 Angelieri 等人[14] [26]在评估诊断效能时排除了处于 CS6 期的受试者, 这也可能在一定程度上影响了结果的普适性。同时有学者[28]也观察到 CS 和 MPSM 分期存在相关性, 但 CS 本身并非 MPSM 的直接影响因素。因此, CS 用于预测对 MPSM 分期的诊断效能, 仍需要更多研究来深入验证。

此外, 有研究者通过对 1076 名儿童及青少年的研究表明[29], CS 与 MPSM 分期的相关性较强, 且 CS3 期至 CS4 期阶段较多个体开始腭中缝骨化闭合, 因此仍然有必要对处于 Cs4 期且拟采用传统 T-RME 的青少年拍摄矫治前 CBCT, 以明确腭中缝骨化闭合状态。同时有学者[30]表明 CS 与腭中缝骨密度比率(midpalatal suture density ratio, MPSDr)的相关性非常显著, 但仍能发现有部分患者即使已经停止个体的生长发育, 其腭中缝仍然未完全地骨化融合。

因此, CS 对识别 MPSM 分期具有重要的指导意义, 呈明显正相关。明确 CS 与 MPSM 的相关性及其诊断效能在一定程度上有助于准确选择扩弓时机。但目前仍然无法通过 CS 来直接判断 MPSM 的分期, 特别是对于 Cs4 期及以后的患者, 仍有必要通过 CBCT 来判断 MPSM 分期, 以决定上颌快速扩弓的时机和选择正确的扩弓方式。

3.4. 评估腭中缝成熟度的其他方法

值得注意的是, 虽然 CBCT 影像为 MPSM 提供了明确的分期标准, 但在实际情况中, CBCT 图像往往呈现出多期特征, 是非常复杂的。如果完全依赖医生的主观判断, 不同评估者, 甚至同一评估者在不同时间都可能会得出不一致的分期结果, 导致诊断的不确定性[31]。而正畸医生为了理想的扩弓效果, 往往会选择 MARPE 或 SARME 来获得骨性扩弓效应。但这不仅使得患者的经济负担加重, 还增加了其骨性扩弓带来的不适与痛苦。

3.4.1. 分形维数

Kwak 等[32]应用分形分析法对 MPSM 进行客观定量评估, 有效降低了主观评估的偏差。研究结果显示, 分形维数与 MPSM 呈显著负相关。该研究确定了分形维数以 1.0235 为最佳临界值, 来区分未融合期(A~C 期)和融合期(D、E 期), 为非手术性 RME 的决策提供参考依据。

但此方法也存在一定局限性。首先, 分形维数与个体骨密度显著相关, 由于骨密度本身存在着明显

的个体差异, 直接比较不同个体间的分形维数值常缺乏临床可比性[33][34]。其次, 分形维数的计算方法具有高度多样性, 其值易受计算方法的影响[35]。因此, 将分形维数运用到临床实际应用的过程中, 需对其计算方法进行统一和标准化。此外, 分形分析包含多个步骤, 从感兴趣区域(ROI)的划定到图像处理操作, 每一环节都可能引入误差, 这些误差逐步累积最终影响结果的准确性。因此, 除选择最优计算方法之外, 还应通过简化计算流程、减少处理环节, 以提高分析的整体准确性及可重复性。

3.4.2. 腭中缝骨密度比率

此外, Grünheid [36]等通过 MPSDr 来量化评估 MPSM。该比值取值范围为 0~1, 值越低表明腭中缝区域骨化闭合程度低, 密度越接近软腭; 反之表明腭中缝区域骨密度越接近上颌骨腭突, 骨化闭合程度越高。

MPSDr 可作为评估扩弓效果、选择扩弓方案及辅助确定扩弓量的有效工具[37]。研究表明, MPSDr 与扩弓效果之间存在显著关联: 实现理想扩弓效果的病例通常具有较低的 MPSDr。此外, MPSDr 与 RME 术后长期骨骼扩张量——如腭大孔间距、鼻腔最大宽度及眶下孔间距的变化——均呈显著负相关。例如, 可通过回归方程 $GPFp = -0.60 \times MPSDr + 0.50$ 预估腭大孔区域的扩张比例(GPFp)。这意味着 MPSDr 越低的患者, 其 MPSM 越低, 越有可能通过传统 RME(T-RME)实现理想的骨骼扩张效果[36]。

然而, Titus 等[38]认为 MPSDr 并不能准确预测实际骨骼扩张量。其研究未发现 MPSDr 与实际骨骼扩张量之间存在显著相关性, 且实际扩张量普遍高于预测值, 提示该比值可能系统性低估长期扩张效果。尽管如此, Titus 等也指出 MPSDr 仍具有一定的临床参考意义, 未来研究可致力于确定其临界值, 以识别那些 T-RME 治疗风险较高的患者, 从而辅助临床选择更适宜的扩弓方式。

4. 人工智能在腭中缝成熟度分期中的研究进展

如今, 人工智能技术在口腔领域取得了巨大的飞跃, 越来越多的研究者将图像处理、传统机器学习、深度学习等人工智能应用于口腔颌面影像诊断领域, 包括三维头颅测量标志点识别[39]、口腔结构分割[40]、疾病诊断[41]等。例如, 人工智能在根尖周病变和根折的检测、种植体设计的优化、口腔癌的诊断等多个领域协助临床医生[42]-[44]。人工智能图像分析被运用于研究口腔颌面部生长发育的领域, 其目的在于能够在临床诊断中给医生提供一致性的评估结果, 从而提高医生的诊断准确率, 但其仍然处于早期探索阶段[45]。

4.1. 人工智能在腭中缝成熟度分期的运用

在医学领域中, 尽管图像处理、传统的机器学习和深度学习等相关算法已经被许多研究者运用到临床诊断以及肿瘤预测等问题中[46]-[48], 但在口腔颌面生长发育领域仍较少。与一般的图像分类任务不同, 在 CBCT 中腭中缝仅占小部分, 并且周围还会有腔窦、牙齿等组织结构, 导致背景复杂多样, 因此通过人工智能进行 MPSM 分期具有一定难度及挑战性。

4.1.1. 基于卷积神经网络的腭中缝成熟度分期

为了应对这一挑战, 有研究[49]对其进行了探究, 使用深度卷积神经网络模型(convolutional neural networks, CNN)评估 CBCT 影像的二维标准化截面上 MPSM 分期, 并且能够给出与医生相比更加准确的结论。CNN 模型具有自动聚焦感兴趣的区域、过滤有用的信息、并且忽略不相关的背景信息等优点, 尽管腭中缝的形态在 CBCT 中较小, 这种特性对腭中缝结构的识别非常有帮助[50]。同时, 在模型验证过程中, 医生对误判病例的反馈也有助于进一步优化模型、提升预测准确率。因此, 在对困难的腭中缝形态进行分期时, 深度学习模型能辅助医生进行判断, 显著地提升了医生的工作效率和诊断的准确率。

4.1.2. 图像融合技术在提升分期准确性中的作用

综合利用图像信息是必要的, 基于计算机视觉的图像融合技术将最大限度地提取并整合 CBCT 中多个切面的信息, 减少干扰, 然后合成高质量的融合图像, 提高了图像数据的可靠性和利用率[51]。与以往通过单一切片进行图像提取和分析腭中缝图像特征的研究相比, 有学者[52]开发了一种图像融合算法, 该算法充分利用 CBCT 多切片图像中的有价值信息, 规避了 CBCT 扫描方向差异和腭穹隆形态的影响, 因此有助于在一张融合图像中显示腭中缝的整体透视图[53]-[55]; 同时利用此类融合图像进行分析, 证明了随着年龄的增长, 腭中缝的成熟度和骨化程度的增加, 并支持了年龄预测模型的构建。

4.1.3. 深度学习模型在分期任务中的性能优化

在此基础上, 有研究[56]采用 ResNet50 等经典架构验证 CNN 模型在识别 MPSM 分期中的能力, 研究表明识别到包含完整腭中缝横截面的准确率达到 99.74%, 并且在两阶段(ABC, DE)、三阶段(AB, C, DE)和五阶段(A, B, C, D, E)成熟度分类任务中, 其识别的准确率均超过了 3 名经验丰富的正畸医师的平均水平, 且用时大大缩短。然而五阶段分类准确率最高为 75.37%, 表明在面对更精细的分期任务时模型性能仍有提升空间。

另有学者[57]开发了一种端对端深度学习网络, 用于自动识别 CBCT 二维截面中 MPSM 分期。这种创新模型结合了注意力机制[58][59]和离散余弦变换层(Discrete Cosine Transform, DCT)。前者通过强化关键区域特征提升模型可解释性与判别能力, 后者则有效地捕获频域特征。同时引入高通和 Sobel 滤波器进一步优化图像与预处理环节, 以增强边缘及结构信息[60][61], 从而改善模型对图像细微差异的感知能力。设计的模型中, MFCRAN_DCT_FC_MNRL 模型的分类准确率最高为 79.02%, 优于现有的多数方法, 展示其在正畸诊断和治疗计划中的良好应用前景。

4.2. 现存不足

人工智能在研究 MPSM 分期方面目前仍存在一些不足, 有待于进一步发展。首先, 现有的人工智能模型主要是基于 Angelieri 等人[14]提出的分类方法, 其本身就缺乏足够的证据来证明其真实性。其主要基于单个图像切片来观察“腭中缝是否融合”, 导致大量有价值的图像信息丢失。以及通过定性评价, 非常依赖于医生的主观判断, 导致了诊断的不确定性。因此 CNN 模型的结果为非验证评分, 需要进一步研究验证其分类方法的真实性及临床实用性。其次, 上述研究[56]在通过完整的腭中缝横截面对 MPSM 进行分类时未探究弯曲腭部以及厚腭不同部位分期不一致的可能性, 并且每个阶段的样本量分布不均。最后, 以往研究的样本量需要扩大, 缺乏大规模特异性图像数据集, 使得训练模型较为复杂, 而数据来源相对单一, 具有一定程度的选择性偏倚, 以及腭中缝 CBCT 单层图像不可避免地会受到其他解剖区域的影响。未来, 应进一步增加样本量, 提高样本质量, 并丰富数据集来源, 获取全国性样本, 以进一步改进算法。

5. 总结与展望

在颅颌面生长发育中, 上颌横向发育不足是较为常见的错颌畸形。RME 是解决上颌横向发育不足的主要方法, 而腭中缝是上颌生长发育的主要部位, 也是 RME 的主要抵抗部位。因此通过拍摄 CBCT 来明确 MPSM, 对于扩弓方式和时机的选择具有重要的临床意义。目前, 广泛应用的评估标准是基于 Angelieri 等人[14]提出的分类方法, MPSM 被分为 5 个时期。MPSM 处于 C 期及以前的患者可通过常规的 RME 进行上颌快速扩弓; 而处于 D、E 期的患者, 更推荐使用 MARPE 或 SARME, 从而避免严重的副作用发生。进一步地, 分形分析和腭中缝骨密度比率等定量方法也被运用于评估腭中缝成熟度。MPSM 与年龄、性别都具有明显的相关性, 但腭中缝融合的年龄变异性很大, 因此年龄并不是评估 MPSM 的可

靠参数。

同时, MPSM 分期与 CS 也呈显著的正相关, 在一定程度上有助于扩弓方式和时机的选择。但仍然无法通过 CS 来直接判断腭中缝具体的成熟阶段, 对于 Cs4 期及以后的患者, 仍有必要通过 CBCT 来判断 MPSM 分期, 以选择最适宜的扩弓方式。

随着人工智能的发展, 深度学习算法在口腔颌面部生长发育等领域展现出初步潜力。在识别 MPSM 分期上, 深度学习模型能给出较高的准确率, 且显著缩短了分析用时。这一突破大大提升了医生的工作效率和诊断的准确率, 具有重要的临床指导意义和重要的临床转化前景。但目前仍存在一定的局限性, 如模型泛化能力有限、对三维形态特征利用不足等。在未来, 可开发基于 CBCT 的三维影像的预测模型, 充分利用空间结构信息, 实现更精准的 MPSM 分期; 并且可以构建融合多模态数据的预测系统, 将 MPSM 与性别、年龄、MPSDr、颈椎骨龄等因素相结合, 开发综合性临床辅助诊断模型。并且将这种临床辅助诊断模型集成于用户友好的临床决策支持软件中, 以便临床医生和患者更好地进行临床沟通与方案抉择。

参考文献

- [1] Priyadarshini, J., Mahesh, C.M., Chandrashekar, B.S., Sundara, A., Arun, A.V. and Reddy, V.P. (2017) Stress and Displacement Patterns in the Craniofacial Skeleton with Rapid Maxillary Expansion—A Finite Element Method Study. *Progress in Orthodontics*, **18**, Article No. 17. <https://doi.org/10.1186/s40510-017-0172-2>
- [2] Quo, S., Lo, L.F. and Guillemineault, C. (2019) Maxillary Protraction to Treat Pediatric Obstructive Sleep Apnea and Maxillary Retrusion: A Preliminary Report. *Sleep Medicine*, **60**, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2018.12.005>
- [3] Liu, S., Xu, T. and Zou, W. (2015) Effects of Rapid Maxillary Expansion on the Midpalatal Suture: A Systematic Review. *The European Journal of Orthodontics*, **37**, 651-655. <https://doi.org/10.1093/ejo/cju100>
- [4] Zuccati, G., Casci, S., Doldo, T. and Clauser, C. (2011) Expansion of Maxillary Arches with Crossbite: A Systematic Review of RCTs in the Last 12 Years. *The European Journal of Orthodontics*, **35**, 29-37. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjr140>
- [5] Hass, A.J. (1961) Rapid Expansion of the Maxillary Dental Arch and Nasal Cavity by Opening the Midpalatal Suture. *The Angle Orthodontist*, **31**, 73-90.
- [6] Angell, E. (1860) Treatment of Irregularity of the Permanent or Adult Teeth. *Dental Cosmos*, **1**, 540-544.
- [7] Baccetti, T., Franchi, L., Cameron, C.G., et al. (2001) Treatment Timing for Rapid Maxillary Expansion. *The Angle Orthodontist*, **71**, 343-350.
- [8] Thadani, M., Shenoy, U., Patle, B., Kalra, A., Goel, S. and Toshinawal, N. (2010) Midpalatal Suture Ossification and Skeletal Maturation: A Comparative Computerized Tomographic Scan and Roentgenographic Study. *Journal of Indian Academy of Oral Medicine and Radiology*, **22**, 81-87. <https://doi.org/10.4103/0972-1363.166921>
- [9] Björk, A. (1966) Sutural Growth of the Upper Face Studied by the Implant Method. *Acta Odontologica Scandinavica*, **24**, 109-127. <https://doi.org/10.3109/00016356609026122>
- [10] Bell, R.A. (1982) A Review of Maxillary Expansion in Relation to Rate of Expansion and Patient's Age. *American Journal of Orthodontics*, **81**, 32-37. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(82\)90285-8](https://doi.org/10.1016/0002-9416(82)90285-8)
- [11] Revelo, B. and Fishman, L.S. (1994) Maturational Evaluation of Ossification of the Midpalatal Suture. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **105**, 288-292. [https://doi.org/10.1016/s0889-5406\(94\)70123-7](https://doi.org/10.1016/s0889-5406(94)70123-7)
- [12] De Grauwe, A., Ayaz, I., Shujaat, S., Dimitrov, S., Gbadegbegnon, L., Vande Vannet, B., et al. (2018) CBCT in Orthodontics: A Systematic Review on Justification of CBCT in a Paediatric Population Prior to Orthodontic Treatment. *European Journal of Orthodontics*, **41**, 381-389. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjy066>
- [13] Gao, L., Sun, J., Zhou, X. and Yu, G. (2022) In Vivo Methods for Evaluating Human Midpalatal Suture Maturation and Ossification: An Updated Review. *International Orthodontics*, **20**, Article ID: 100634. <https://doi.org/10.1016/j.ortho.2022.100634>
- [14] Angelieri, F., Cevidanes, L.H.S., Franchi, L., Gonçalves, J.R., Benavides, E. and McNamara Jr, J.A. (2013) Midpalatal Suture Maturation: Classification Method for Individual Assessment before Rapid Maxillary Expansion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **144**, 759-769. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.04.022>
- [15] Melsen, B. (1972) A Histological Study of the Influence of Sutural Morphology and Skeletal Maturation on Rapid Palatal Expansion in Children. *Transactions of the European Orthodontic Society*, 499-507.
- [16] Angelieri, F., Franchi, L., Cevidanes, L.H.S., Bueno-Silva, B. and McNamara Jr., J.A. (2016) Prediction of Rapid

- Maxillary Expansion by Assessing the Maturation of the Midpalatal Suture on Cone Beam CT. *Dental Press Journal of Orthodontics*, **21**, 115-125. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.21.6.115-125.sar>
- [17] Melsen, B. (1975) Palatal Growth Studied on Human Autopsy Material. A Histologic Microradiographic Study. *American Journal of Orthodontics*, **68**, 42-54. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(75\)90158-x](https://doi.org/10.1016/0002-9416(75)90158-x)
- [18] Persson, M. and Thilander, B. (1977) Palatal Suture Closure in Man from 15 to 35 Years of Age. *American Journal of Orthodontics*, **72**, 42-52. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(77\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0002-9416(77)90123-3)
- [19] Wehrbein, H. (2001) The Mid-Palatal Suture in Young Adults. A Radiological-Histological Investigation. *The European Journal of Orthodontics*, **23**, 105-114. <https://doi.org/10.1093/ejo/23.2.105>
- [20] Angelieri, F., Franchi, L., Cevidanes, L.H.S., Gonçalves, J.R., Nieri, M., Wolford, L.M., et al. (2017) Cone Beam Computed Tomography Evaluation of Midpalatal Suture Maturation in Adults. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, **46**, 1557-1561. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2017.06.021>
- [21] Jimenez-Valdivia, L.M., Malpartida-Carrillo, V., Rodríguez-Cárdenas, Y.A., Dias-Da Silveira, H.L. and Arriola-Guillén, L.E. (2019) Midpalatal Suture Maturation Stage Assessment in Adolescents and Young Adults Using Cone-Beam Computed Tomography. *Progress in Orthodontics*, **20**, Article No. 38. <https://doi.org/10.1186/s40510-019-0291-z>
- [22] Knaup, B., Yildizhan, F. and Wehrbein, H. (2004) Age-Related Changes in the Midpalatal Suture. *Journal of Orofacial Orthopedics*, **65**, 467-474. <https://doi.org/10.1007/s00056-004-0415-y>
- [23] Korbmacher, H., Schilling, A., Püschel, K., Amling, M. and Kahl-Nieke, B. (2007) Age-Dependent Three-Dimensional Microcomputed Tomography Analysis of the Human Midpalatal Suture. *Journal of Orofacial Orthopedics*, **68**, 364-376. <https://doi.org/10.1007/s00056-007-0729-7>
- [24] Fishman, L.S. (1982) Radiographic Evaluation of Skeletal Maturation. A Clinically Oriented Method Based on Hand-Wrist Films. *The Angle Orthodontist*, **52**, 88-112.
- [25] Baccetti, T., Franchi, L. and McNamara, J.A. (2005) The Cervical Vertebral Maturation (CVM) Method for the Assessment of Optimal Treatment Timing in Dentofacial Orthopedics. *Seminars in Orthodontics*, **11**, 119-129. <https://doi.org/10.1053/j.sodo.2005.04.005>
- [26] Angelieri, F., Franchi, L., Cevidanes, L.H.S. and McNamara Jr., J.A. (2015) Diagnostic Performance of Skeletal Maturity for the Assessment of Midpalatal Suture Maturation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **148**, 1010-1016. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2015.06.016>
- [27] Barbosa, N.M.V., Castro, A.C.d., Conti, F., Capelozza-Filho, L., Almeida-Pedrin, R.R.d. and Cardoso, M.d.A. (2018) Reliability and Reproducibility of the Method of Assessment of Midpalatal Suture Maturation: A Tomographic Study. *The Angle Orthodontist*, **89**, 71-77. <https://doi.org/10.2319/121317-859.1>
- [28] 张洁, 张卫兵. 10-20 岁骨性 II 类患者上颌腭中缝成熟程度的 CBCT 评估分析[J]. 口腔医学, 2020, 40(12): 1094-1097.
- [29] 高璐, 古岩. 中国 1076 名儿童及青年腭中缝影像学分期与其颈椎骨龄分期的相关性研究[J]. 中华口腔医学杂志, 2021, 56(3): 251-255.
- [30] 郑英泽, 范存晖, 刘洋, 赵阳, 刘晓洁, 刘翠玉, 张艺严. 颈椎骨龄与腭中缝骨密度比率的相关性研究[J]. 中华口腔正畸学杂志, 2023, 30(2): 61-65.
- [31] Buzatu, R., Nagib, R., Dincă, M., et al. (2018) Midpalatal Suture Morphology and Bone Density Evaluation after Orthodontic Expansion: A Cone-Bean Computed Tomography Study in Correlation with Aesthetic Parameters. *Romanian Journal of Morphology and Embryology*, **59**, 803-809.
- [32] Kwak, K.H., Kim, S.S., Kim, Y. and Kim, Y. (2016) Quantitative Evaluation of Midpalatal Suture Maturation via Fractal Analysis. *The Korean Journal of Orthodontics*, **46**, 323-330. <https://doi.org/10.4041/kjod.2016.46.5.323>
- [33] Lee, R.L., Dacre, J.E. and James, M.F. (1997) Image Processing Assessment of Femoral Osteopenia. *Journal of Digital Imaging*, **10**, 218-221. <https://doi.org/10.1007/bf03168705>
- [34] Majumdar, S., Lin, J., Link, T., Millard, J., Augat, P., Ouyang, X., et al. (1999) Fractal Analysis of Radiographs: Assessment of Trabecular Bone Structure and Prediction of Elastic Modulus and Strength. *Medical Physics*, **26**, 1330-1340. <https://doi.org/10.1118/1.598628>
- [35] Geraets, W.G. and van der Stelt, P.F. (2000) Fractal Properties of Bone. *Dentomaxillofacial Radiology*, **29**, 144-153. <https://doi.org/10.1038/sj/dmfr/4600524>
- [36] Grünheid, T., Larson, C.E. and Larson, B.E. (2017) Midpalatal Suture Density Ratio: A Novel Predictor of Skeletal Response to Rapid Maxillary Expansion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **151**, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2016.06.043>
- [37] Ok, U. and Kaya, T.U. (2022) Fractal Perspective on the Rapid Maxillary Expansion Treatment; Evaluation of the Relationship between Midpalatal Suture Opening and Dental Effects. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*,

- 123, 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2021.09.002>
- [38] Titus, S., Larson, B.E. and Grünheid, T. (2021) Midpalatal Suture Density Ratio: Assessing the Predictive Power of a Novel Predictor of Skeletal Response to Maxillary Expansion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **159**, e157-e167. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.09.019>
- [39] Dot, G., Schouman, T., Chang, S., Rafflenbeul, F., Kerbrat, A., Rouch, P., et al. (2022) Automatic 3-Dimensional Cephalometric Landmarking via Deep Learning. *Journal of Dental Research*, **101**, 1380-1387. <https://doi.org/10.1177/00220345221112333>
- [40] Schneider, L., Arsiwala-Scheppach, L., Krois, J., Meyer-Lueckel, H., Bressemer, K.K., Niehues, S.M., et al. (2022) Benchmarking Deep Learning Models for Tooth Structure Segmentation. *Journal of Dental Research*, **101**, 1343-1349. <https://doi.org/10.1177/00220345221100169>
- [41] Lee, J., Kim, D. and Jeong, S. (2019) Diagnosis of Cystic Lesions Using Panoramic and Cone Beam Computed Tomographic Images Based on Deep Learning Neural Network. *Oral Diseases*, **26**, 152-158. <https://doi.org/10.1111/odi.13223>
- [42] Aminoshariae, A., Kulild, J. and Nagendrababu, V. (2021) Artificial Intelligence in Endodontics: Current Applications and Future Directions. *Journal of Endodontics*, **47**, 1352-1357. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.06.003>
- [43] Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Vyas, S., Barmak, B.A., Galluci, G.O., Att, W., et al. (2023) Artificial Intelligence Applications in Implant Dentistry: A Systematic Review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **129**, 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.05.008>
- [44] Khanagar, S.B., Naik, S., Al Kheraif, A.A., Vishwanathaiah, S., Maganur, P.C., Alhazmi, Y., et al. (2021) Application and Performance of Artificial Intelligence Technology in Oral Cancer Diagnosis and Prediction of Prognosis: A Systematic Review. *Diagnostics*, **11**, Article No. 1004. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11061004>
- [45] Ren, R., Luo, H., Su, C., Yao, Y. and Liao, W. (2021) Machine Learning in Dental, Oral and Craniofacial Imaging: A Review of Recent Progress. *PeerJ*, **9**, e11451. <https://doi.org/10.7717/peerj.11451>
- [46] Rajpurkar, P., Irvin, J., Ball, R.L., Zhu, K., Yang, B., Mehta, H., et al. (2018) Deep Learning for Chest Radiograph Diagnosis: A Retrospective Comparison of the CheXnext Algorithm to Practicing Radiologists. *PLOS Medicine*, **15**, e1002686. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002686>
- [47] Hussain, F., Saeed, U., Muhammad, G., Islam, N. and Sheikh, G.S. (2019) Classifying Cancer Patients Based on DNA Sequences Using Machine Learning. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, **9**, 436-443. <https://doi.org/10.1166/jmihi.2019.2602>
- [48] 付玢, 易思琦, 龚华荣, 等. 基于深度学习的阴道镜及磁共振图像子宫识别研究[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2018, 24(5): 393-396.
- [49] 陈宇彤, 焦庆磊, 朱明, 等. 深度学习算法在腮中缝成熟度分期中的应用[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2020, 26(2): 115-119.
- [50] Sistaninejhad, B., Rasi, H. and Nayeri, P. (2023) A Review Paper about Deep Learning for Medical Image Analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, **2023**, Article ID: 7091301. <https://doi.org/10.1155/2023/7091301>
- [51] Guruviah, V., Haribabu, M. and Yogarajah, P. (2023) Recent Advancements in Multimodal Medical Image Fusion Techniques for Better Diagnosis: An Overview. *Current Medical Imaging Reviews*, **19**, 673-694. <https://doi.org/10.2174/1573405618666220606161137>
- [52] Gao, L., Chen, Z., Zang, L., Sun, Z., Wang, Q. and Yu, G. (2022) Midpalatal Suture CBCT Image Quantitative Characteristics Analysis Based on Machine Learning Algorithm Construction and Optimization. *Bioengineering*, **9**, Article No. 316. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9070316>
- [53] Bhataria, K.C. and Shah, B.K. (2018) A Review of Image Fusion Techniques. 2018 2nd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, 15-16 February 2018, 114-123. <https://doi.org/10.1109/iccmc.2018.8487686>
- [54] Yadav, J., Dogra, A., Goyal, B. and Agrawal, S. (2017) A Review on Image Fusion Methodologies and Applications. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, **10**, 1239-1251. <https://doi.org/10.5958/0974-360x.2017.00221.9>
- [55] Sahu, D.K. and Parsai, M. (2012) Different Image Fusion Techniques—A Critical Review. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, **2**, 4298-4301.
- [56] Zhu, M., Yang, P., Bian, C., Zuo, F., Guo, Z., Wang, Y., et al. (2024) Convolutional Neural Network-Assisted Diagnosis of Midpalatal Suture Maturation Stage in Cone-Beam Computed Tomography. *Journal of Dentistry*, **141**, Article ID: 104808. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104808>
- [57] Milani, O.H., Mills, L., Nikho, A., Tliba, M., Allareddy, V., Ansari, R., et al. (2025) Automated Classification of Midpalatal Suture Maturation Stages from CBCTs Using an End-to-End Deep Learning Framework. *Scientific Reports*, **15**,

Article No. 18783. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03778-y>

- [58] Xie, Y., Yang, B., Guan, Q., *et al.* (2023) Attention Mechanisms in Medical Image Segmentation: A Survey.
- [59] Karacan, M.H. and Yucebas, S.C. (2022) A Deep Learning Model with Attention Mechanism for Dental Image Segmentation. 2022 *International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, Ankara, 9-11 June 2022, 1-4. <https://doi.org/10.1109/hora55278.2022.9800072>
- [60] Agrawal, A. and Bhogal, R.K. (2018) Edge Detection Techniques in Dental Radiographs (Sobel, T1FLS & IT2FLS). In: *Communications in Computer and Information Science*, Springer, 411-421.
- [61] Dogra, A. and Bhalla, P. (2014) Image Sharpening by Gaussian and Butterworth High Pass Filter. *Biomedical and Pharmacology Journal*, **7**, 707-713. <https://doi.org/10.13005/bpj/545>